

偏振变换法测量固体激光器的动态热焦距

罗 宽,王 菲,车 英,张国玉

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要: 为了精确测量激光晶体的动态热焦距,提出了一种指示光偏振变换测量方法。基于几何光学成像理论,建立了热透镜动态热焦距的表达式。将准直的指示光往返两次通过具有热透镜效应的激光晶体,利用偏振变换的方法使测量光束有效的从光路中分离出来,采用 CCD 相机对被测光束进行探测。搭建了激光晶体的动态热焦距的实验测量装置,分别测量了端面泵浦和侧面泵浦两种工作状态激光晶体的动态热焦距,最后分析了实验测量的误差。结果表明:利用指示光偏振变换法测量激光晶体的热焦距,测量误差仅为 0.8 mm,能够满足激光器谐振腔设计要求。

关键词: 固体激光器; 热透镜; 动态热焦距; 偏振变换

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1017003

Dynamic thermal focus length of solid state laser measured by polarization conversion

Luo Kuan, Wang Fei, Che Ying, Zhang Guoyu

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To measure accurately dynamic thermal focus length of laser crystal in solid state laser, a new and accurate method for measuring dynamic thermal focus length by means of the indicator light polarization converted was presented in the paper. A formula of dynamic thermal focus length was established based on imaging theory of geometrical optics. An indicator light was traveled through laser medium which possessed thermal lens effect round trips. The measuring beam was separated from the optical path by a method of polarization converted. Then, the measuring beam was detected by CCD camera. The experiment setup for measuring dynamic thermal focus length of laser crystal was put up and the dynamic thermal focus length of laser crystal end-pumped and side-pumped were measured respectively. The measuring error was analyzed at last. The result showed that the measuring error of dynamic thermal focus length is only 0.8 mm by means of the indicator light polarization conversion, and the error can completely meet the design requirements for laser cavity.

Key words: solid state laser; thermal lens; dynamic thermal focus length; polarization conversion

收稿日期:2016-02-10; 修订日期:2016-03-15

基金项目:吉林省科技计划(20110328, 20150204047GX);长春市科技计划(2013263, 2014020, 2014219)

作者简介:罗宽(1980-),男,讲师,博士生,主要从事光电测控技术方面的研究。Email: luokuanccc@163.com

导师简介:张国玉(1962-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事光电仪器与检测技术方面的研究。Email: zh_guoyu@163.com

0 引言

固体激光器在动态运转时,大量的泵浦能量转化成废热并沉积在激光介质内部,在冷却不均匀的外部条件下,激光介质中心温度高,边缘温度低,等效于一个厚透镜,即热透镜,并且随着泵浦功率的变化热透镜的焦距也在相应变化^[1-4]。热透镜效应制约着激光器输出激光的光束质量、稳定性等各项性能参数,因此对激光介质热透镜焦距的精确测量是激光器设计的关键^[5]。

在关于激光介质热焦距的阐述中通常有静态热焦距和动态热焦距两种,静态热焦距与动态热焦距存在较大的差异,静态热焦距无法反映激光器动态运转的实际状况。因此,精确测量激光介质动态热焦距对激光器谐振腔设计具有重要的指导意义^[6]。研究人员提出了非稳定腔法、端面形变计算、干涉条纹法、波前探测法、构造开普勒望远系统、基模光斑法及功率测量法等多种方法来测量激光介质动态热焦距^[7-12]。非稳定腔法是目前最常用的测量方法,它是基于谐振腔工作在临界腔状态,在不同的腔长条件下,通过寻找激光输出为 0 或功率曲线拐点对应的泵浦功率,以热透镜焦点位于相应的腔镜面上来确定热焦距,该方法在测量不同泵浦功率的热焦距时均需要改变腔长,测量过程繁琐,且在大功率泵浦情况下由于多模激光加入振荡,从而会导致无激光输出为 0 的情况发生,或者是功率拐点位置对应的热透镜焦点和腔镜面不重合,测量误差大。

文中提出了一种指示光偏振变换法测量固体激光晶体动态热焦距,是固定谐振腔结构参数的条件下测量激光晶体的热焦距,测量过程中不需要变更腔长,不仅适应于侧面泵浦固体激光器,也适应于端面泵浦固体激光器激光工作物质动态热焦距的精确测量,测量误差小于 1 mm。

1 理论分析

如图 1 所示,平行光经过热透镜 T_1 折射后入射到平面镜上,从平面镜反射的光束再次经过热透镜 T_1 折射,折射光与光轴相交于点 F' ,通过在光路中设置一个半径为 r 的孔径光阑来保证经过 M_1 镜反射的光能够通过激光介质。此过程平行光束往返两

次通过激光介质,相当于平行光通过由热透镜 T_1 与热透镜 T_2 (透镜 T_1 关于平面镜 M_1 所成的像)构成的组合光学系统,如图 2 所示。

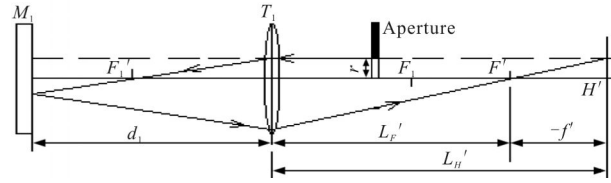


图 1 几何光路简图

Fig.1 Schematic diagram of geometric optical path

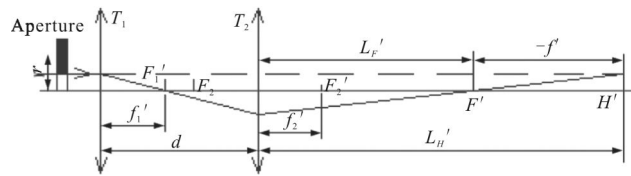


图 2 组合光学系统光路示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical path for combinative optical system

设热透镜 T_1 焦距 f_{T_1}' , 热透镜 T_1 的像 T_2 焦距为 f_{T_2}' , 组合焦距 f' , 则

$$f_T' = f_{T_1}' = f_{T_2}' \quad (1)$$

T_1 和 T_2 间距离为:

$$d = 2d_1 \quad (2)$$

在图 2 所示的组合光学系统中,若组合光学系统的焦点 F' 点位置和主面位置 H' 点已知,则

$$f' = L_{H'} - L_{F'} \quad (3)$$

根据组合光学系统成像关系:

$$L_{F'} = f' \left(1 - \frac{d}{f_T'}\right) \quad (4)$$

综合公式(1)~(4)可以得出热透镜 T_1 的焦距:

$$f_T' = \frac{2d_1 f'}{f' - L_{F'}} \quad (5)$$

2 激光晶体的动态热焦距实验测量

为了便于将入射和出射指示光相分离,通过偏振光变换使入射光和出射光转换为偏振方向相互垂直的两束线偏振光,利用偏振分束棱镜将这两束相互垂直的线偏振光进行分离,从而利于对被测光束测量。

实验测量光路如图 3 所示。平面镜 M_2 、激光晶体和平面镜 M_3 构成激光器的谐振腔,需要注意的是在图 3(b)的 LD 端面泵浦激光器谐振腔中,有时候

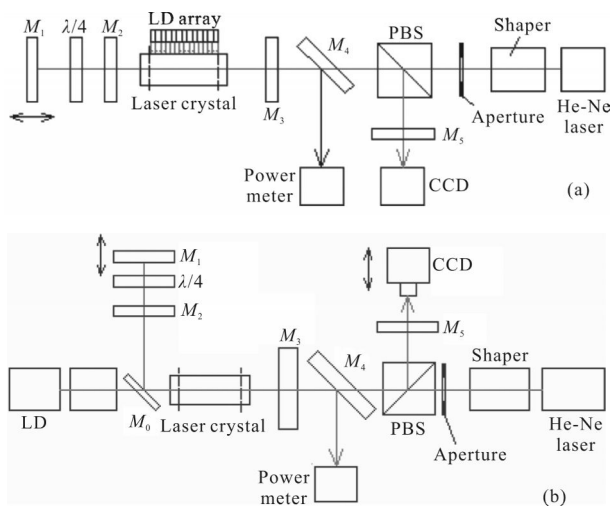


图 3 实验装置(a)侧面泵浦激光器和(b)端面泵浦激光器

Fig.3 Experimental setup (a)side-pumped laser and (b)end-pumped laser

高反射 M_2 镜是直接镀制在激光晶体左端面上的高反射膜层。二向色平面镜 M_4 将动态输出的激光束与测量光束相分离,从而避免被测动态运转激光器输出的激光破坏 CCD 相机。氦氖激光器输出的光束经过整形器整形后变换成近似平行的平顶光束,经过光阑后输出近似均匀的光束,该均匀光束入射到偏振分束棱镜 PBS 上后, s 光透射, p 光被 PBS 的对角面反射, s 光依次经过 M_4 镜、平面镜 M_3 、激光晶体、 M_2 镜和 $1/4$ 波片,最后在平面镜 M_1 表面被反射,由于往返两次通过 $1/4$ 波片, s 光变成了 p 光,而后通过 M_2 镜、激光晶体、 M_3 镜和 M_4 镜,在偏振分束棱镜 PBS 的分束面上被反射,通过衰减滤光片 M_5 ,最后被 CCD 相机接收。

图 3 中实验测量装置的激光晶体动态热焦距等效测量光路如图 4 所示。设定激光晶体左侧主面到 M_1 镜距离 d_1 , 右侧主面到偏振分束棱镜 PBS 距离 d_2 , 偏振分束棱镜 PBS 到聚焦光斑处距离为 d_3 , M_4 镜、 M_3 镜和衰减滤光片 M_5 的厚度忽略不计, 偏振分束棱镜 PBS 的光学厚度 d_0 。

选择合适的光阑半径 r , 在某一泵浦功率下, 轴向移动 CCD 相机直至 CCD 相机接收到的光斑达到最小值, 则 CCD 相机所接收到的图像是平行光经过两个相同热透镜的聚焦光斑, 记录此时的位置即为 F' 点, 若始终找不到 F' 点, 则需要辅助轴向移动 M_1 镜, 其中 d_1 的取值要保证测量光束在激光晶体中未出现光路的遮挡。继续沿轴向远离 PBS 方向移动 CCD

相机, 直到 CCD 相机接收到的光斑半径恰好等于光阑半径 r 为止, 记录此时的位置即为 F' 点。

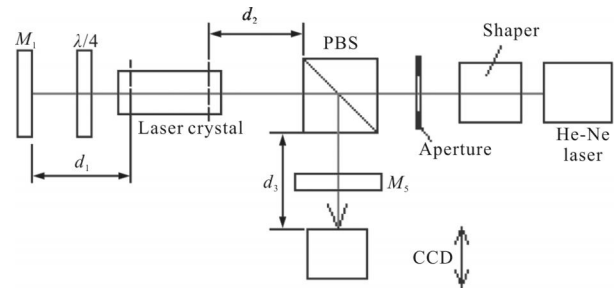


图 4 等效光路图

Fig.4 Schematic diagram of the equivalent optical path

由公式(5)可知, 激光晶体的动态热焦距又可以表示为:

$$f'_T = \frac{2d_1 f'}{f' - L_{F'}} = \frac{2d_1 f'}{f' - (d_2 + d_3 + nd_0)} \quad (6)$$

式中: n 为 PBS 棱镜材料的折射率, 这里 PBS 棱镜材料为 BK7 光学玻璃, 在 632.8 nm 处其折射率 n 约为 1.515。

在图 3(a)的侧面泵浦实验装置中, 激光晶体选用 $\Phi 7 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 激光晶体, Nd 离子掺杂浓度为 0.7at%, 激光晶体双面镀 1 064 nm 增透膜, 输出镜 M_3 镜透射率为 20%, 光阑半径 r 为 1 mm。在图 3(b)的 LD 端面泵浦实验装置中, 激光晶体选用 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 的 Nd:YVO₄ 晶体, Nd 离子掺杂浓度为 0.5at.%, 晶体一端镀 1 064 nm 和 808 nm 增透膜, 另一端镀 1 064 nm 增透膜, 输出镜 M_3 镜透射率为 10%, 光阑半径 r 为 1 mm。谐振腔均为平行平面对称腔结构, 且腔长均为 410 mm。利用公式(6), 在不同泵浦功率下, 测量激光晶体的动态热焦距曲线如图 5 和图 6 所示。

图 5 和图 6 分别给出了侧面泵浦和端面泵浦情况下晶体的热焦距曲线, 激光晶体的动态热焦距随泵浦功率的增加呈明显下降趋势, 并且当泵浦功率较小时, 热焦距较大, 随着泵浦功率加大, 热焦距减小, 但变小的趋势逐渐变缓。

在图 6 中, 给出了激光晶体的动态和静态热焦距曲线, 二者在变化趋势具有一定的相似性, 且静态热焦距比动态热焦距要小一些, 这是由于晶体在动态工作时输出了一部分能量, 即产生激光输出。在泵浦功率较低时激光晶体产生的热量较少, 动态输出

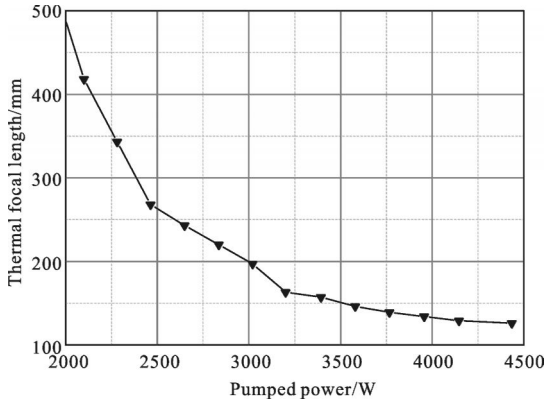


图 5 侧面泵浦激光晶体动态热焦距曲线

Fig.5 Curve of dynamic thermal focus length for side-pumped laser crystal

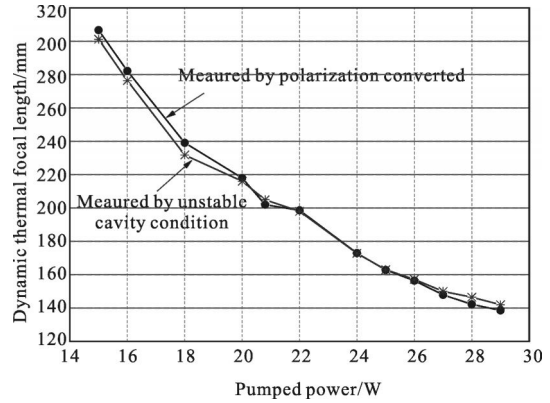


图 7 端面泵浦激光晶体动态热焦距曲线

Fig.7 Curve of dynamic thermal focus length for end-pumped laser crystal

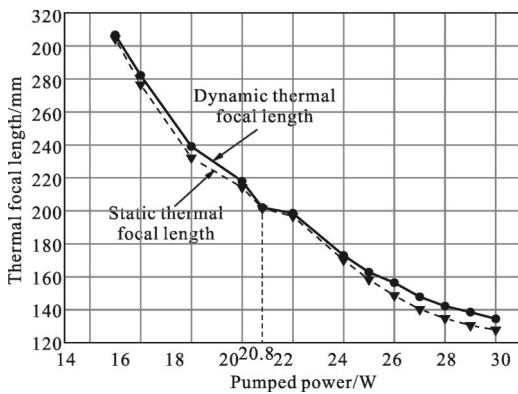


图 6 端面泵浦激光晶体的动态和静态热焦距曲线

Fig.6 Curve of dynamic and static thermal focus length for end-pumped laser crystal

的激光功率较低,泵浦的能量主要通过铜热沉导出,故激光晶体的动态热焦距和静态热焦距的差值较小;随着泵浦功率加大,二者的差值先增大后减小;在 20.8 W 泵浦功率时二者几乎相等,这时激光器工作在临界腔状态,输出激光功率较小;此后随着泵浦功率的加大,激光器输出的功率相应增大,二者的差值逐渐增大,当泵浦功率增大到一定程度后,二者均趋于变化平缓,且二者差值有减小的趋势,这表明动态输出的激光功率对激光晶体热效应的影响逐渐减弱。

图 7 给出了偏振分束法和非稳定腔法测量的激光晶体的动态热焦距曲线,在泵浦功率较低时,腔长较长,腔内损耗较大,非稳定腔法测量的值相对较小;在泵浦功率较高时,腔长较短从而使得高阶模实现振荡,在输出功率曲线上出现功率拐点位置将延后,即非稳定腔法测量的值相对较大。

3 测量误差分析

指示光偏振变换法测量固体激光晶体的动态热焦距,其测量误差主要来源于 d_1 、 L_F' 和 f' 的测量误差,而其中 L_F' 的测量误差主要来源于 d_0 、 d_2 、 d_3 和激光晶体长度测量误差,除此之外还有聚焦光斑位置测量误差; f' 测量误差主要来源于 CCD 相机轴向运动误差,同时包括聚焦光斑 F' 点和主面位置 H' 点测量误差。根据公式(6),激光晶体动态热焦距的测量误差为:

$$\sigma_{f'} = \sqrt{\left(\frac{\partial f_T'}{\partial d_1}\right)^2 \sigma_{d_1}^2 + \left(\frac{\partial f_T'}{\partial L_F'}\right)^2 \sigma_{L_F'}^2 + \left(\frac{\partial f_T'}{\partial f'}\right)^2 \sigma_{f'}^2} \quad (7)$$

式中: d_1 和 f' 的测量误差 σ_{d_1} 和 $\sigma_{f'}$ 均为 0.1 mm。 d_0 、 d_2 、 d_3 的测量误差 σ_{d_0} 、 σ_{d_2} 和 σ_{d_3} 分别为 0.05 mm、0.1 mm 和 0.1 mm,则 L_F' 测量误差 $\sigma_{L_F'} = \sqrt{\sigma_{d_0}^2 + \sigma_{d_2}^2 + n^2 \sigma_{d_3}^2} \approx 0.16$ mm。

若 $f':d_1:L_F'$ 为 2:3:4 时,代入公式(7)可以得到动态热焦距的测量误差约为 0.8 mm。

4 结论

激光介质的热透镜效应是影响激光器光束质量和工作稳定性的关键,对激光介质热焦距的精确测量是激光器设计的具有重要指导意义。采用稳腔条件法测量热焦距时,激光器恰好处于临界腔状态,在低泵浦功率时测量值比实际值偏小,而在大功率泵浦时测量值比实际值偏大。文中提出了一种指示光偏振变换法测量激光介质动态热焦距,在激光器动态输出情况下测得激光晶体的热焦距参数,测量的

误差为 0.8 mm, 能够满足激光器谐振腔设计的要求。该方法简单、测量精度高, 不仅适于侧面泵浦固体激光器激光介质热透镜焦距的测量, 也适于端面泵浦固体激光器热透镜焦距的测量。

参考文献:

- [1] Huang Jing, Hu Xiuhuan, Chen Weibiao, et al. LD-pumped electro-optically Q-switched 946 nm Nd: YAG laser with pulse repetition of 1 kHz [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2015, 42(6): 0602008. (in Chinese)
黄晶, 胡秀寒, 陈卫标, 等. LD 抽运 1 kHz 电光调 Q 946nm Nd: YAG 激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602008.
- [2] Mao Yefei, Zhang Hengli, Xu Liu, et al. Laser diode double-end-direct-pumped slab laser with hybrid resonator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(1): 014203. (in Chinese)
毛叶飞, 张恒利, 徐浏, 等. 激光二极管双端直接抽运混合腔板条激光器[J]. 物理学报, 2015, 64(1): 014203.
- [3] Qu Pengfei, Wang Shiyu, Guo Zhen, et al. Analysis of interaction between thermal effect and pump optical field distribution in high power solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1114002. (in Chinese)
屈鹏飞, 王石语, 过振, 等. 高功率固体激光器中抽运光和热效应的相互作用分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1114002.
- [4] Han Yaofeng, Zhang Ruofan, Yang Hongru, et al. Time-variable thermal effect in side-pump high power pulsed Nd: YAG laser[J]. *High Power Laser and Particle beams*, 2015, 27(6): 061005. (in Chinese)
韩耀锋, 张若凡, 杨鸿儒, 等. 脉冲 LDA 侧面泵浦大能量 Nd: YAG 激光器时变热效应分析 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061005.
- [5] Bian Jintian, Wang Xi. Measuring thermal lens effect of LD-pumped solid-state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 391-394. (in Chinese)
卞进田, 王玺. 半导体泵浦固体激光器热透镜效应测量方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 391-394.
- [6] Liu Meibiao, Liu Xiaoming, Ren Zhijun, et al. Wavefront measurement of crystal dynamic thermal lens effect and thermal aberrations in a PW Ti: sapphire laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 835-839. (in Chinese)
刘美标, 陆效明, 任志君, 等. 拍瓦级激光系统前端波前热畸变和晶体动态热透镜效应的测量 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 835-839.
- [7] Geng Aicong, Zhao Ci, Bo Yong, et al. A method for measuring thermal focal length of LD side pumped laser crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 6987-6991. (in Chinese)
耿爱丛, 赵慈, 薄勇, 等. 一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法 [J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6987-6991.
- [8] Niu Ronglian, Liu Chengcheng, Liu Ying, et al. Thermal lensing effect of diode-pumped Yb: KGd (WO₄)₂ based on convective heat-transfer on the side surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 78-82. (in Chinese)
牛荣莲, 刘成成, 刘莹, 等. 基于侧面热对流的 LD 泵浦 Yb: KGd (WO₄)₂ 热透镜效应研究 [J]. 光子学报, 2011, 40(1): 78-82.
- [9] Zou Jing, Zhao Shengzhi, Yang Kejian, et al. A simple method to determine the thermal focal length of solid-state lasers with rate equation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39: 778-781.
- [10] Yang Yongming, Guo Zhen, Wang Shiyu, et al. A new Method called interference stripe method for measuring the whole thermal focal lens in LD end pumped Nd: YAG crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 202-204. (in Chinese)
杨永明, 过振, 王石语, 等. 干涉条纹法测量 LD 端面泵浦 Nd: YAG 热透镜焦距[J]. 光学学报, 2005, 34(2): 202-204.
- [11] Wang Fei, Feng Jinliang, Wei Jianwei, et al. Measurement of thermal focus length by accessorial lens to constitute Keplerian telescope system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2): 219-221. (in Chinese)
王菲, 冯进良, 魏剑维, 等. 辅助透镜构造开普勒望远系统法测量热焦距[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 219-221.
- [12] Zhang Chaobo, Song Feng, Meng Fanzhen, et al. Measurement of the laser diode end-pumped solid laser's thermal focal length by using the curve of output[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1517-1520. (in Chinese)
张潮波, 宋峰, 孟凡臻, 等. 利用输出功率测量激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜焦距 [J]. 物理学报, 2002, 51(7): 1517-1520.